Tampereen yliopisto

Juho Komulainen

KESTÄVÄ KEHITYS JA KIERRÄTYS ELEKTRONIIKKALAITTEEN TUOTESUUNNITTELUSSA

Kandidaatintyö
Informaatioteknologian ja viestinnän tiedekunta
Tarkastaja: Katja Laine
Syyskuu 2024

TIIVISTELMÄ

Juho Komulainen: Kestävä kehitys ja kierrätys elektronikkalaitteen tuotesuunnittelussa
Kandidaatintyö
Tampereen yliopisto
Tieto- ja sähkötekniikan tutkinto-ohjelma
Syyskuu 2024

Elektroniikkatuotannon kehitys ja elektroniikkalaitteiden kulutus on lisääntynyt merkittävästi viime vuosien aikana. Kulutuksen lisääntymisen myötä, myös elektroniikkajätteen määrä on lisääntynyt. Elektroniikkajätteiden kertymisen myötä myös ilmastovaikutukset ovat alkaneet näkyä entistä selkeämmin. Tämä on tuonut haasteita erityisesti elektroniikkajätteiden lajitteluun ja kierrättämiseen. Tämän myötä kuitenkin kestävä kehitys, kierrätys ja kiertotalous ovat nousseet entistä enemmän pinnalle.

Tutkimuksessani pyrin löytämään ratkaisuja elektroniikkajätteiden käsittelyyn ja elektroniikkalaitteiden suunnitteluun sekä elinkaarenhallintaan kestävän kehityksen periaatteet huomioiden. Tutkimuskysymykseni on: Miten elektroniikkajätteen ja elektroniikkalaitteiden elinkaarenhallinnan avulla voitaisiin edistää kestävän kehityksen tavoitteita, kiertotaloutta ja kierrätystä elektroniikkateollisuudessa? Pyrin lisäksi myös tuomaan esille lainsäädäntöä, kuten erilaisia standardeja, säädöksiä ja lakeja, joita on säädetty kestävän kehityksen periaatteiden toteutumiseksi elektroniikkalaitteiden tuotesuunnittelussa. Lisäksi pohdin tutkimuksessani tulevaisuuden näkymiä elektroniikkalaitteiden tuotesuunnittelun osalta. Tutkimuksessani käytän aineistona erilaisia tieteellisiä artikkeleita ja tutkimuksia, joiden avulla pyrin saamaan vastauksia tutkimuskysymykseeni.

Tutkimukseni tulosten perusteella elektroniikkalaitteiden elinkaarenhallinta on kaiken kaikkiaan hyvin monimutkainen prosessi ja kestävän kehityksen periaatteiden huomioiminen vaatii tarkkaa suunnittelua. Kierrätyksen ja kiertotalouden edistäminen vaatii uhrauksia niin yrityksiltä kuin myös valtioiltakin. Ilmastonmuutoksen torjumisessa on erittäin tärkeää, että pidetään kiinni niistä laista, standardeista ja säädöksistä, joita on säädetty sekä kansainvälisellä että paikallisella tasolla. Tarvittaessa lainsäädäntöä voidaan myös uudistaa ympäristöuhan torjumiseksi. Elektroniikkalaitteiden tuotesuunnittelussa on myös tärkeää maailmanlaajuinen yhteistyö eri valtioiden välillä. Erilaisten innovaatioiden ja kierrätysteknologioiden kehittäminen voivat ollakin avaintekijä ilmastokriisin ratkaisemisessa.

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OrginalityCheck -ohjelmalla

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO 1
2. KESTÄVÄN KEHITYKSEN JA KIERRÄTYKSEN MERKITYS 3
2.1 Kestävä kehitys, kierrätys ja kiertotalous 3
2.2 Kestävän kehityksen ja kierrätyksen haasteet 4
2.2.1 Kestävän kehityksen haasteet 4
2.2.2 Kierrätyksen haasteet 5
3. ELEKTRONIIKKAJÄTTEIDEN HALLINTA JA KIERRÄTYSTEKNOLOGIAT 7
3.1 Elektroniikkajätteen kierrätyksen haasteet ja mahdollisuudet 7
3.2 Kierrätysteknologiat elektroniikkajätteelle 8
4. ELEKTRONIIKKALAITTEIDEN ELINKAARENHALLINTA 9
4.1 Suunnittelu 9
4.2 Käytön aikainen elinkaarenhallinta 9
4.3 Käytön jälkeinen elinkaarenhallinta 10
5. STANDARDIT JA LAINSÄÄDÄNTÖ KIERRÄTYKSEN EDISTÄMISESSÄ 12
5.1 Kansainväliset säädökset ja standardit 12
5.2 EU:n direktiivit 13
5.3 Lainsäädäntö Suomessa 14
6. TULEVAISUUS 15
6.1 Tekoäly ja jätteenkäsittelymenetelmät 15
6.2 Kuluttajien rooli 16
6.3 Globaali yhteistyö 16
6.3 Kiertotalouden edistäminen 17
9. YHTEENVETO 19
LÄHTEET 21

LYHENTEET JA MERKINNÄT

ISO 14001	engl. International Organization for Standardization 14001, ympäristönsuojelua edistävä kansainvälinen ympäristöstandardi
PA CAD	engl. Parametric Associative Computer-Aided Design, auttavat tuotteisiin liitettävien monimutkaisten komponenttien liittämisessä ja kierrätettävyydessä
RDM	engl. Robust Design Methology, auttaa tuotteen elinkaaren ympäristönäkökulmien huomioimisessa sekä laadun ja kestävyyden parantamisessa
ROHS-direktiivi	engl. Restriction of Hazardous Substances Directive, direktiivi, jonka tarkoituksena on rajoittaa vaarallisten aineiden käyttöä elektroniikkateollisuudessa
UN	engl. United Nations, Yhdistyneet Kansakunnat on järjestö, jonka tarkoituksena on edistää kansainvälistä yhteistyötä, turvallisuutta ja ihmisoikeuksien kunnioittamista
WEEE-direktiivi	engl. Waste Electrical and Electronic Equipment Directive, EU:n määrittelemä direktiivi, joka asettaa kriteerit elektroniikkajätteen keräykselle, kierrätykselle ja käsittelylle

.

1. JOHDANTO

Elektroniikkatuotannon kehitys ja elektroniikkakulutuksen lisääntyminen ovat avanneet ovia lukuisille mahdollisuuksille, mutta samalla ne ovat tuoneet haasteita kestävän kehityksen näkökulmasta. Tämän seurauksena elektroniikkalaitteiden elinkaaren hallinta ja elektroniikkateollisuuden ympäristövaikutukset ovat nousseet keskiöön, sillä olemme alkaneet ymmärtämään paremmin niiden vaikutuksia ihmisen terveyteen sekä ympäristöön. Teknologinen kehitys tarjoaa jatkuvasti uusia innovaatioita, mutta nopeasti kertyvä elektroniikkajäte on ympäristön kannalta suuri riskitekijä. Elektroniikkajätteen käsittely ja kierrätys ovatkin nousseet avainasemaan kestävän kehityksen edistämisessä ja ympäristönsuojelussa elektroniikkateollisuudessa.

Elektroniikkalaitteiden elinkaaren hallinnan sekä elektroniikkajätteiden käsittelyn haasteiden lisäksi on tärkeää tarkastella myös elektroniikkalaitteiden valmistusprosessien ympäristövaikutuksia. Elektroniikkalaitteiden tuotannossa käytetään haitallisia materiaaleja, joiden louhiminen aiheuttaa merkittäviä ekosysteemien häiriöitä sekä ympäristökuormitusta. Lisäksi elektroniikkateollisuuden energiankulutus ja päästöt ovat ympäristön kannalta huomattava huolenaihe.

Tämän työn tutkimuskysymys on: Miten elektroniikkajätteen ja elektroniikkalaitteiden elinkaarenhallinnan avulla voitaisiin edistää kestävän kehityksen tavoitteita, kierrätystä ja kiertotaloutta elektroniikkateollisuudessa? Työssä tarkastellaan elektroniikkalaitteiden kestävän kehityksen, kierrätyksen ja kiertotalouden haasteita ja mahdollisuuksia eri näkökulmista. Kestävä kehitys, kierrätys ja kiertotalous nousevat esille varsinkin luvussa kaksi. Työssä pyritään löytämään myös vastuullisia ja kestäviä ratkaisuja keskeisimpiin ympäristöhaasteisiin, jotka liittyvät elektroniikkalaitteen suunnitteluun, valmistukseen sekä käyttöön. Seuraavissa luvuissa käsitellään kestävän kehityksen ja kierrätyksen merkitystä elektroniikkalaitteiden suunnittelussa ja valmistuksessa. Lisäksi elektroniikkajätteen käsitteleminen nousee esille luvussa 3. Elektroniikkalaitteiden elinkaaren hallinta ja kierrätettävyys nousevat puolestaan esille luvussa 4.

Pyrin tuomaan työssäni myös esille erilaisia standardeja ja lainsäädäntöjä kierrätyksen edistämisessä luvussa 5. Pyrin tuomaan lainsäädännön näkökulmaa esille sekä kansainvälisellä tasolla että myös paikallisella tasolla.

Pohdin myös elektroniikkalaitteiden tulevaisuutta kestävän kehityksen, kierrätyksen ja kiertotalouden näkökulmista luvussa 6. Lisäksi pyrin tuomaan esille kuluttajien roolia ja ohjelmia, joita on tehty kansainvälisesti kestävän kehityksen uusien innovaatioiden ja kierrätyksen edistämiseksi.

Lopuksi tehdään vielä yhteenveto työssä käsitellyistä aiheista ja tarkastellaan mahdollisia johtopäätöksiä elektroniikkalaitteiden kestävän kehityksen edistämisessä.

2. KESTÄVÄN KEHITYKSEN JA KIERRÄTYKSEN MERKITYS

Elektroniikkalaitteiden kestävän kehityksen ja kierrätyksen merkitys korostuvat nyky-yhteiskunnassa ilmastonmuutoksen ja muiden ympäristökysymysten tullessa entistä voimakkaammin esille. Tässä luvussa tarkastellaan, miten nämä kysymykset ilmenevät ja miksi kestävän kehityksen ja kierrätyksen merkitys on kasvanut. Lisäksi luvussa käsitellään kestävän kehityksen ja kierrätyksen peruskäsitteitä sekä niiden merkitystä ympäristön suojelemisessa.

2.1 Kestävä kehitys, kierrätys ja kiertotalous

Kestävän kehityksen käsitteellä on pitkä historia ja se tuli esille ensimmäisen kerran jo vuonna 1713. [1] Vuonna 1987 julkaistussa Brundtlandin raportissa kestävä kehitys määriteltiin "taloudelliseksi kehitykseksi, joka täyttää nykyajan ihmisten tarpeet vahingoittamatta tulevien sukupolvien tyytyväisyyttä” [2]. Tätä määritelmää on käytetty vuodesta 1987 asti ja sitä käytetään edelleen.

Kestävän kehityksen käsite alkoi tulla vahvemmin esille 1980-luvulla. YK:n ympäristö- ja kehityskonferenssissa vuonna 1992 maailman yhteisö teki sopimuksen kestävän kehityksen tarpeellisuudesta, jonka tavoitteena oli säilyttää ympäristö tuleville sukupolville ja tasapainottaa tämän kanssa sekä sosiaaliset että taloudelliset haasteet. [3] Näin voitaisiin turvata ympäristön monimuotoisuus ja sen tarjoamat mahdollisuudet tuleville sukupolville.

Kierrätys on käsite, joka väistämättä nousee esiin kestävästä kehityksestä puhuttaessa. Se mahdollistaa materiaalien uudelleenkäytön ja on keskeinen tekijä ilmastonmuutoksen estämisessä. Kierrätyksen periaatteen mukaan tuotteita ja materiaaleja käytetään uudelleen niiden alkuperäisen käytön jälkeen. Tämä vähentääkin merkittävästi jätteiden syntymistä, mikä omalta osaltaan säästää luonnonvaroja ja vähentää ympäristön kuormitusta.

Kierrätyksen merkitys nyky-yhteiskunnassa korostuu entisestään, koska ilmastonmuutoksen ympäristövaikutukset alkavat näkyä entistä selkeämmin. Ilmaston lämpötilan onkin ennustettu nousevan 1.4–5.8 celsius-astetta vuoteen 2100 mennessä. [4] Tietoisuus ilmastonmuutoksen vakavista seurauksista on kuitenkin lisääntynyt ja kierrätys on avainasemassa sen torjumisessa. Kierrätyksen ansiosta uusia raaka-aineita ei tarvitse louhia, mikä säästää luonnonvaroja ja vähentää ympäristön kuormitusta

entisestään. Lisäksi kierrätys vähentää jätteiden kertymistä ja mahdollistaa luonnon monimuotoisuuden säilyttämisen. Esimerkiksi paperin uudelleenkäyttö vähentää tarvetta metsähakkuisiin, minkä seurauksena ekosysteemit ja puut säilyvät.

Kiertotalous on toinen käsite, joka usein yhdistetään kestävään kehitykseen. Se on taloudellinen ja toiminnallinen malli, jonka tavoitteena on minimoida resurssien sekä jätteiden hukka uudelleenkäyttämällä materiaaleja mahdollisimman tehokkaasti. Tätä varten järjestelmät, tuotteet ja palvelut on suunniteltava siten, että tuotteiden elinkaaren pituus maksimoidaan. Tuotteiden elinkaarta voidaan pidentää jakamalla, vuokraamalla, uudelleenkäyttämällä ja kierrättämällä materiaaleja. [5]

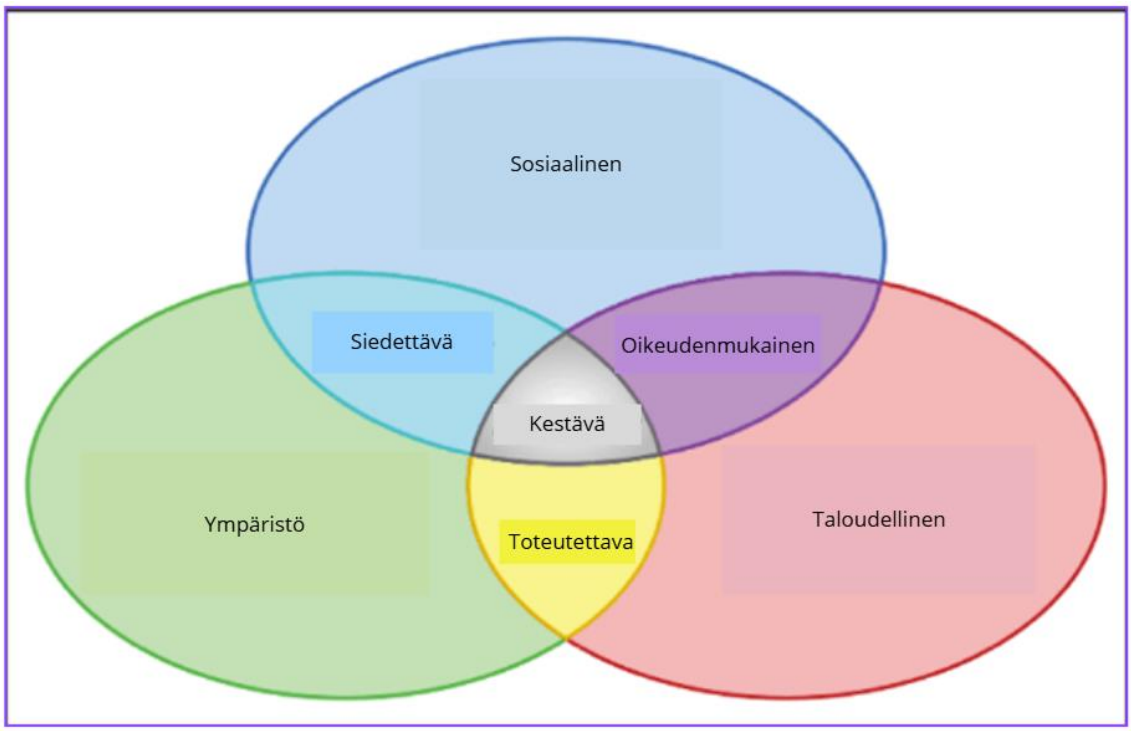
2.2 Kestävän kehityksen ja kierrätyksen haasteet

Kestävä kehitys ja kierrätys tarjoavat ympäristöystävällisiä ja ekologisia ratkaisuja nykyajan ympäristöongelmiin, mutta niihin liittyy myös haasteita. Tässä alaluvussa käsitellään näihin käsitteisiin liittyviä haasteita sekä vaikutusta yhteiskuntaan.

2.4.1 Kestävän kehityksen haasteet

Yksi keskeisistä kestävän kehityksen haasteista on tasapainon löytäminen taloudellisen kasvun ja ympäristön kestävyyden välillä. Globaalit markkinat ja taloudellinen kilpailu voivat luoda haasteita ympäristöystävällisten toimenpiteiden suorittamiseen. Lisäksi logistiikan ja alueellisen kehityksen haasteisiin liittyy erilaisten sidosryhmien integroinnin tarve päätöksentekoprosesseihin, jotta voidaan varmistaa kestävän kehityksen kriteerien täyttyminen ja periaatteiden noudattaminen. [6]

Lisäksi kestävän kehityksen haasteena on yrityksen tarve muuttaa liiketoimintamalleja sekä logistiikkakäytäntöjä ympäristöystävällisimpiä ratkaisuja kohti. Tämän seurauksena yritys voi joutua tekemään investointeja uuteen teknologiaan, koulutukseen sekä infrastruktuurin kehittämiseen. Uusien investointien tekeminen vaatii yritykseltä resursseja. Kuvassa yksi on eritelty kestävän kehityksen eri osa-alueet. [6]



Kuva 1. *Kestävän kehityksen kaavio: kolmen perusosan yhtymäkohdassa muokattu lähteestä [6].*

2.4.2 Kierrätyksen haasteet

Kierrätyksessä on monia haasteita ja ne on otettava huomioon kierrätyksen suunnittelussa sekä toteutuksessa. Yksi kierrätyksen merkittävimmistä haasteista on kierrätettävien materiaalien kontaminaatio, joka tarkoittaa kierrätettävien materiaalien seassa olevia haitallisia aineita. Kontaminaation vuoksi kierrätysprosessi vaikeutuu huomattavasti ja se voi heikentää kierrätysmateriaalien laatua. Pahimmassa tapauksessa kontaminaation seurauksena kierrätettäviä materiaaleja ei voida enää käyttää. [7]

Toinen kierrätykseen liittyvä haaste ovat käsittelykustannukset, jotka kattavat kierrätysjärjestelmän ylläpidon sekä toteutuksen. Nämä kustannukset voivat nousta esimerkiksi investointien kautta. Esimerkiksi vanhentuneiden laitteiden tilalle uuteen teknologiaan satsaaminen sekä henkilöstön palkkaus voivat nostaa kustannuksia.

Lisäksi yksi merkittävä kierrätykseen liittyvä haaste on kuluttajien osallistaminen. Kuluttajat ovat avainasemassa kierrätyksen tehokkuuden takaamisessa, jonka takia kuluttajat on saatava kierrättämään. Kierrätyksen tietoisuuden kasvattaminen kuitenkin vaatii paljon resursseja. Kuluttajien tietoisuutta voitaisiin kasvattaa esimerkiksi erilaisilla kierrätyksen tietoisuutta kasvattavilla kampanjoilla. [7]

Ympäristövaikutukset ovat myös suuri haaste kierrätyksessä. Vaikka kierrätys saattaakin vähentää näennäisesti ympäristökuormitusta, niin sen prosessit voivat aiheuttaa päästöjä. Tämän takia on tärkeää punnita hyötyjen ja haittojen suhde kierrätysprosessien suunnittelussa.

3. ELEKTRONIIKKAJÄTTEIDEN HALLINTA JA KIERRÄTYSTEKNOLOGIAT

Elektroniikkalaitteiden elinkaari on lyhentynyt teknologisen kehityksen ja elektroniikkatuotannon alan kasvun myötä. Tämän vuoksi myös elektroniikkajätteiden määrä on kasvanut huomattavasti. Tässä luvussa käsitellään kestäviin materiaaleihin ja innovatiivisiin kierrätysteknologioihin siirtymistä. Lisäksi luvussa käsitellään sitä, miten erilaisilla kierrätysratkaisuilla pystytään paremmin hillitsemään elektroniikkajätteiden kertymistä. Luvussa käsitellään lisäksi erilaisia materiaaleja, joita käytetään elektroniikkalaitteiden tuotannossa sekä niiden haasteita ja mahdollisuuksia.

3.1 Elektroniikkajätteen kierrätyksen haasteet ja mahdollisuudet

Elektroniikkajätteen hallinnasta on tullut maailmanlaajuinen haaste ja sillä on vaikutuksia niin ympäristöön kuin myös ihmisen terveyteen [8]. Elektroniikkajätteen hallinta on erityisen tärkeää, sillä elektroniikkajäte sisältää orgaanisia aineita, kuten muoveja ja erilaisia raskasmetalleja ja nämä voivat kertyä ravintoketjuihin sekä ekosysteemeihin [8]. Elektroniikkajätteiden kierrätyksen avulla voidaan kuitenkin vähentää elektroniikkajätteiden syntymistä ja joissain tapauksissa myös esimerkiksi yrityksien materiaalikustannuksia.

Elektroniikkajätteiden hallinnassa on erityisen tärkeää pohtia erilaisia vaihtoehtoja ja kestäviä ratkaisuja. Näitä voisi olla esimerkiksi tehokkaammat kierrätysprosessit ja ympäristöystävällisemmät käsittelymenetelmät [9]. On myös tärkeää ottaa huomioon elektroniikkajätteiden kierrätyksessä työskentelevät henkilöt, koska he voivat altistua kemiallisille, fysikaalisille, psykososiaalisille sekä ergonomisille haittavaikutuksille, joita elektroniikkajätteiden käsittelyssä voi mahdollisesti syntyä. [10]. Elektroniikkajätteiden kemialliset, fysikaaliset ja metallurgiset kierrätysprosessit sekä kierrätysteknologian merkitys ovatkin keskeisessä asemassa elektroniikkajätteen hallinnassa tulevaisuudessa, sillä niiden hyvä hallinta voi tarjota ratkaisuja kestävän kehityksen haasteisiin [11].

3.2 Kierrätysteknologiat elektroniikkajätteelle

Elektroniikkajätteen kierrätys vaatii monipuolisia kierrätysratkaisuja. Näiden avulla voidaan erotella arvokkaat materiaalit muusta jätteestä ja ottaa ne talteen

uudelleenkäyttöä varten. Nämä kierrätysratkaisut ovat jo hyvin edenneitä kehittyneissä maissa, mutta kehitysmaissa kierrätysratkaisujen soveltaminen on vielä alkuvaiheessa.

Kehitysmaissa, kuten Intiassa hyvin suuri osa elektroniikkajätteestä kierrätetään epävirallisesti, mikä aiheuttaa suuria ympäristö- ja terveysriskejä. Erityisesti epävirallisessa kierrätyksessä käytettyjen kierrätysteknologioiden kehittäminen tarjoaa paremman tavan arvokkaiden materiaalien talteenottoon ja uudelleenkäyttöön sekä vähentää kierrätyksestä aiheutuvia negatiivisia vaikutuksia [12]. Arvokkaiden materiaalien talteenotto ja uudelleenkäyttö ovatkin tärkeitä aspekteja kierrätysteknologioita sovellettaessa, mutta riittämättömät keräysinfrastruktuurit ja kuluttajien vähäinen tietoisuus kierrätyksestä ovat merkittäviä haasteita varsinkin kehitysmaissa [11].

Kehittyneissä maissa tilanne on kuitenkin huomattavasti parempi. Monissa kehitysvaltioissa elektroniikkajätteen kierrätysratkaisut, kuten lasin, metallien ja muovien kierrätysmenetelmät ovat huomattavasti paremmalla tasolla. [13]. Nämä teknologiat vähentävät huomattavalla tavalla elektroniikkajätteen aiheuttamia ympäristö- ja terveysriskejä. Erityisesti elektroniikkajätteen sisältämät ongelmalliset materiaalit ja aineet, kuten bromatut palonestoaineet ja raskasmetallit vaativat kehittyneitä teknologioita kierrätyksessä [14]. Näiden kehittyneiden teknologioiden toteuttaminen ja uudistaminen ovatkin keskeisessä roolissa elektroniikkajätteen hallinnassa sekä kestävän kehityksen päämäärien saavuttamisessa.

4. ELEKTRONIIKKALAITTEIDEN ELINKAARENHALLINTA

Kestävän kehityksen toteutuksessa korostuu elektroniikkalaitteiden elinkaarenhallinta ja materiaalien kierrätettävyys. Tässä luvussa käsitellään elektroniikkalaitteiden elinkaaren kulkua sekä erilaisia tapoja, joilla sitä voidaan hallita.

4.1 Suunnittelu

Elektroniikkatuotteiden valmistusta edeltävä vaihe on suunnitteluvaihe. Suunnitteluvaiheessa on tärkeä ottaa kaikki tuotteen elinkaaren vaiheet huomioon, jotta voidaan vastata markkinoiden kysyntään ja samalla turvata kestävän kehityksen toteutuminen [14]. Hyvin suunnitellun tuotteen pystyy helposti kierrättämään, eikä se vaadi kohtuuttomasti resursseja. Lisäksi hyvin suunnitellussa tuotteessa osat ovat sellaisia, jotka pystytään tarvittaessa vaihtamaan.

Tuotesuunnittelun avuksi on kehitetty erilaisia menetelmiä, joiden avulla pystytään helpommin hallitsemaan eri elinkaaren vaiheita. Yksi tällainen on Robust Design Methology (lyhennettynä RDM). RDM:n avulla ympäristönäkökulmien huomioon on helpompaa ja sen avulla voidaan vähentää tuotteen ympäristövaikutuksia. Lisäksi tuotteen laatu ja kestävyys voivat parantua RDM:n käytön myötä. [15]

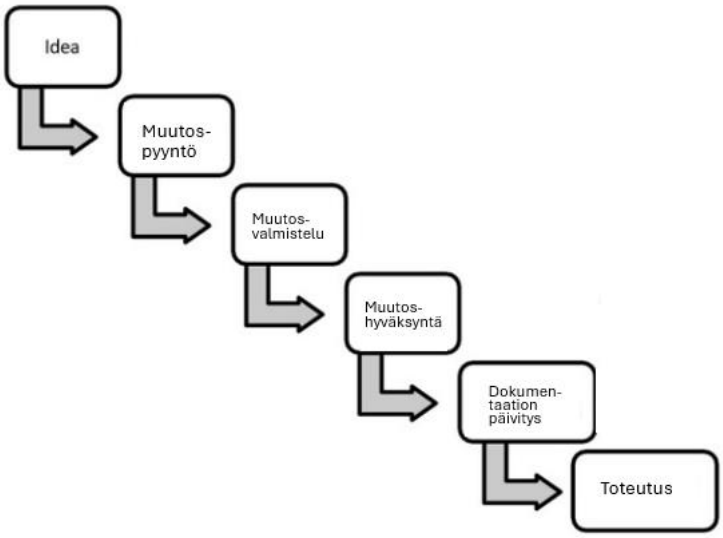
Toinen tuotesuunnittelun avuksi kehitetty menetelmä on PA CAD (parametric associative computer-aided design systems, suomeksi parametriset assosiatiiviset tietokoneavusteiset menetelmät). PA CAD:n avulla monimutkaisten komponenttien liittäminen tuotteisiin helpottuu, minkä ansiosta myös tuotteiden kierrätettävyys paranee. PA CAD onkin tärkeä työkalu suunnittelun tueksi, sillä sen käyttö voi parantaa tehokkuutta ja tuotteiden elinkaaren hallintaa. [16]

4.2 Käytön aikainen elinkaarenhallinta

Elektroniikkalaitteiden käytön aikana tapahtuva elinkaarenhallinta on hyvin tärkeä aspekti kierrätettävyyden ja kestävän kehityksen periaatteiden toteutumisen kannalta. Käytön aikana onkin todella tärkeää huolehtia toimivista huoltotoimenpiteistä, kuten siitä että laitteen osat voidaan helposti korvata toisilla ja laitetta päivitetään tasaisin väliajoin. Näin voidaan maksimoida laitteen käyttöikä. Laitteen elinkaarenhallinta onkin keskiössä tuotehallintastrategiassa, joka kattaa kaikki laitteen elinkaaren vaiheet. [14]

Laitteen elinkaarenhallintaa voidaan tehostaa esimerkiksi hyvällä tiedonhallinalla sekä jäljitettävyydellä. Hyvä tiedonhallinta mahdollistaakin sen, että korjauspyynnöt voidaan ottaa vastaan nopeasti ja ne voidaan käsitellä tehokkaasti. Hyvä jäljitettävyys puolestaan mahdollistaa sen, että laite voidaan helposti jäljittää ja tämä nopeuttaa huoltotoimenpiteitä omalta osaltaan. [17]

Elektroniikkalaitteen elinkaarenhallinnassa on myös tärkeää tuotekehityksen ja erilaisten muutosten hallinta. Muutosten hallinta mahdollistaa sen, että tuotekehitykseen kuluva aika vähenee ja tuotteen laatu paranee. Kuvassa 2 on näytetty muutosten integroiminen tuotantoon. [18]



Kuva 2. *Muutosten integroimisen vaiheet tuotantoon [19].*

4.3 Käytön jälkeinen elinkaarenhallinta

Elektroniikkalaitteiden elinkaarenhallinnassa keskeisessä roolissa on myös käytön jälkeinen elinkaarenhallinta. Esimerkiksi se, miten tuotteet kierrätetään ja uudelleen käytetään ovat merkittäviä aspekteja, kun puhutaan ympäristövaikutuksista, joita elektroniikkajätteestä syntyy. Se, miten laitteet kierrätetään vaikuttaakin merkittävästi jätteiden syntyyn ja kiertotalouteen [19].

Jätteiden syntyä voidaan kierrätyksen ja uudelleen käytön lisäksi hillitä esimerkiksi korjausten sekä laitteiden vähentämisen avulla [20]. Yritystoiminnassa onkin tärkeää pohtia eettiseltä kannalta yritystoimintaa: onko tärkeämpää se, että yritystoiminta on mahdollisimman kannattavaa vai onko ympäristö etusijalla? Esimerkiksi nykyajan kännyköiden akut ovat tehty sellaisiksi, että ne eivät kestä kauaa, joten kuluttajat joutuvat ostamaan uusia kännyköitä tasaisin väliajoin. Tämä lisää elektroniikkalaitteiden tuottamaa jätteen määrää merkittävästi. Jätteen määrää voitaisiin kuitenkin hillitä sillä,

että akuista tehtäisiin kestävämmät, mikä ei ole yritykselle välttämättä niin kannattavaa, mutta eettisesti se olisi varmasti parempi ratkaisu.

5. STANDARDIT JA LAINSÄÄDÄNTÖ KIERRÄTYKSEN EDISTÄMISESSÄ

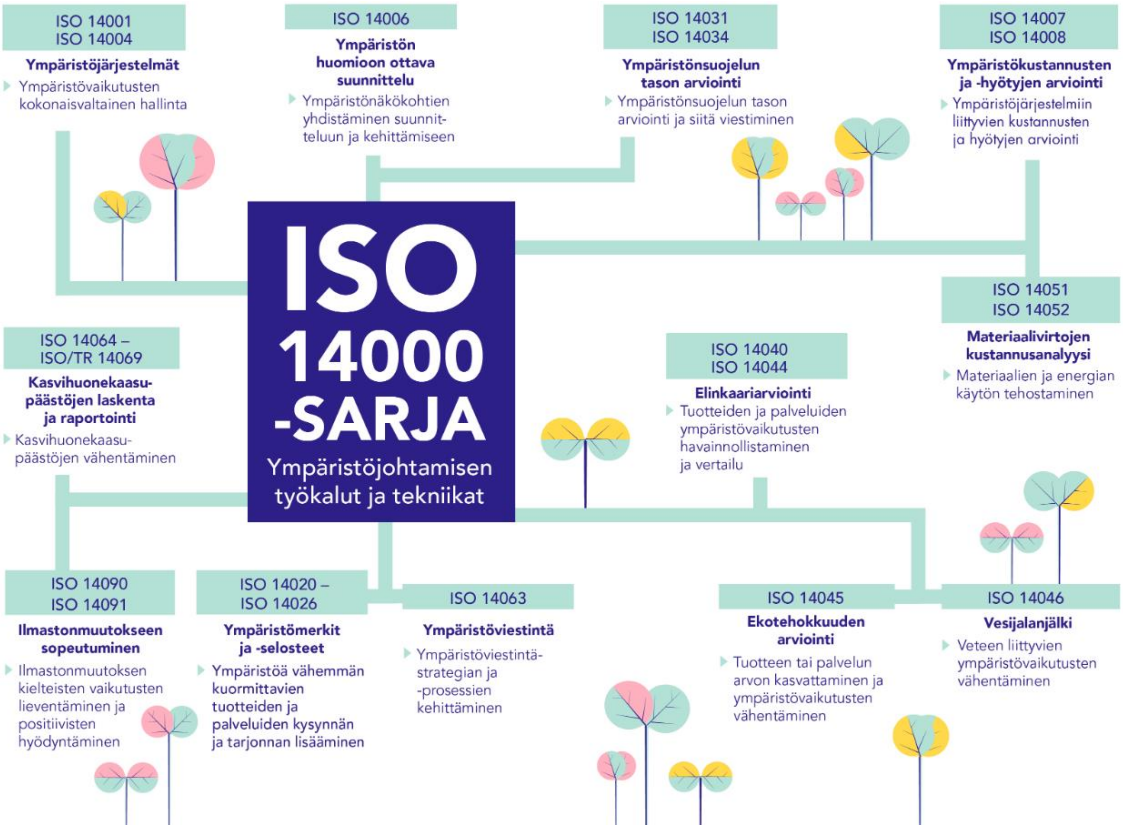
Kuten kaikissa asioissa, myös elektroniikkalaitteiden kierrätyksessä on hyvä olla pelisäännöt. Tässä luvussa käsitellään erilaisia säädöksiä ja standardeja, joita on tehty turvaamaan kierrätyksen edistäminen elektroniikkalaitteiden tuotannossa.

5.1 Kansainväliset säädökset ja standardit

Kansainväliset säädökset ja standardit ovat keskeisessä roolissa eri maiden yhdenmukaistamisessa kierrätyksen suhteen. Nämä ovat erittäin tärkeitä, sillä ilmastonmuutoksen torjuminen on mahdollista vain, jos kaikki valtiot sitoutuvat noudattamaan yhteisiä vaatimuksia. Tässä aliluvussa esitellään erilaisia kansainvälisiä säädöksiä ja standardeja, joita on tehty kierrätyksen edistämiseksi elektroniikkalaitteiden tuotannossa.

Yksi kansainvälinen säädös, joka on tehty kierrätyksen edistämiseen elektroniikkalaitteiden tuotannossa, on Baselin yleissopimus. Se hallitsee vaarallisten aineiden kuljetusta eri maiden välillä ja varmistaa niiden oikeanlaisen hävityksen. Lisäksi sen mukaan kehitysmaihin ei saa viedä vaarallisia aineita ilman kehitysmaan lupaa. [21]

ISO 14001 on puolestaan standardi, jonka tavoitteena on vähentää ympäristön kuormitusta. Sen vaatimusten avulla voidaan ohjata eri organisaatioita ottamaan käyttöön erilaisia ympäristönsuojelua edistäviä järjestelmiä. Ympäristönsuojelua edistävien järjestelmien lisäksi ISO 14001 asettaa vaatimukset myös kierrätykselle ja jätteiden hallinnalle. ISO standardeihin kuuluu myös lukuisia muita standardeja, joita on esitelty kuvassa 3. [22]



Kuva 3. *Erilaiset ISO standardit [23].*

5.2 EU:n direktiivit

Yksi tärkeimmistä EU:n tekemistä säädöksistä on WEEE-direktiivi. Kyseinen direktiivi on asettanut kriteerit elektroniikkalaitteiden tuottaman elektroniikkajätteen hävitykselle sekä kierrätykselle. Sen tavoitteena onkin kierrätyksen edistäminen ja elektroniikkajätteen vähentäminen. [23]

Toinen tärkeä EU:n asettama direktiivi on RoHS-direktiivi. Se rajoittaa tiettyjen tarkkaan määriteltyjen vaarallisten aineiden kuten lyijyn ja elohopean käyttöä elektroniikkalaitteissa. RoHS-direktiivin tavoitteena on vähentää terveysriskejä sekä helpottaa elektroniikkalaitteiden kierrättämistä. [24]

Ekosuunnitteludirektiivi on puolestaan EU:n direktiivi, joka sisältää ympäristövaatimuksia monille eri tuotteille kierrätyksen suhteen (sisältää siis myös elektroniikkalaitteet). Tämän direktiivin tavoitteena on niin ikään edistää kierrättämistä ja lisäksi parantaa eri tuotteiden ympäristötehokkuutta. [25]

5.3 Lainsäädäntö Suomessa

Suomessa lainsäädäntö elektroniikkalaitteiden kierrätyksen suhteen perustuu suurilta osin erilaisiin kansainvälisiin sopimuksiin. Suomessa on kuitenkin kehitetty myös omia lakeja sekä ohjelmia, jotka ohjaavat elektroniikkajätteen kierrätyksen edistämiseen. Yksi näistä on “Kiertotalouden strateginen ohjelma”. Sen tavoitteena on vähentää uusiutumattomien luonnonvarojen käyttöä ja lisätä uusiutuvien luonnonvarojen käyttöä [26]. Lisäksi sen tavoitteena on kaksinkertaistaa resurssien tuottavuus ja kiertotalousaste vuodesta 2015 vuoteen 2035 [27].

Suomessa on myös kehitetty jätelaki. Sen tarkoituksena on niin ikään edistää kiertotaloutta. Lisäksi sen tavoitteina ovat myös jätteen määrän vähentäminen, luonnonvarojen kestävyyden edistäminen, jätteiden ja jätehuollon aiheuttavan vaaran minimoiminen sekä roskaantumisen ehkäiseminen. Lain mukaan on kaikin tavoin ehkäistävä jätteiden syntymistä, mutta jos jätettä syntyy, “jätteen haltijan on ensisijaisesti valmisteltava jäte uudelleenkäyttöä varten tai toissijaisesti kierrätettävä se”. [26]

Suomen ympäristöä koskevien lakien ja ohjelmien lainsäädäntöä säätelee ja valvoo ympäristöministeriö. Ympäristöministeriö on vastuussa yhteistyöstä EU:n kanssa ja sen vastuualueisiin kuuluu EU:n ympäristösopimusten toimeenpano. Ympäristöministeriön tavoitteina ovat kokonaisvaltainen ympäristönsuojelu, kiertotalouden sekä kierrätyksen edistäminen. [28]

6. TULEVAISUUS

Elektroniikkajätteen kertyminen on nopeutunut viime vuosina erittäin paljon. Tähän syynä on teknologinen kehitys sekä tämän myötä markkinoiden kasvu ja taloudellisen hyödyn hakeminen. Elektroniikkajätteen kertymisen seurauksena ilmastonmuutos nopeutuu ilman kestäviä kierrätysratkaisuja. Tulevaisuudessa erilaiset kierrätysratkaisut ja kiertotalouden edistäminen tulevatkin olemaan keskiössä ilmastonmuutoksen torjumisessa.

6.1 Tekoäly ja jätteenkäsittelymenetelmät

Elektroniikkajätteen kierrätysratkaisuja on kehitettävä ilmastonmuutoksen torjumiseksi tulevina vuosina. Tähän yksi ratkaisu voisi olla tekoäly. Tekoälyn avulla voidaan kehittää kierrätysprosesseja automatisoinnin ja paremman talteenoton näkökulmista. Lisäksi tekoälyn avulla voidaan parantaa kierrätysmateriaalien lajittelua, mikä omalta osaltaan parantaisi kierrätysprosessin tehokkuutta. [29]

Tekoälyn potentiaalia kasvattaa sen kyky oppia. Tekoäly on viime vuosina kehittynyt nopeaa vauhtia ja se todennäköisesti kehittyy tulevaisuudessa edelleen. Jätteiden hallinnassa sen datan analysoiminen voi tulevaisuudessa auttaa myös jätteidenlajittelujärjestelmien optimoinnissa [29].

Tekoälyssä on kuitenkin haasteita, kuten esimerkiksi datan laadun ja saatavuden varmistaminen. Lisäksi yksityisyys ja turvallisuus ovat huomioitavia tekijöitä. Myös eettisyys, infrastruktuurivaatimukset ja tekoälyn vaatimat kustannukset on otettava huomioon. Näiden haasteiden voittamiseksi eri toimijoiden, kuten jätehuolto-organisaatioiden, teknologiatoimittajien, tutkijoiden ja päättäjien on tehtävä tiivistä yhteistyötä. [29]

Toinen ratkaisu voisi olla bioteknologia. Bioteknologia on kehittynyt suurin harppausaskelin viime vuosina ja se voisi olla hyvinkin ympäristöystävällinen ratkaisu. Bioteknologiaa voidaan soveltaa esimerkiksi erilaisten materiaalien, kuten metallien erotteluun. [13] Tämän takia se soveltuisi erittäin hyvin juurikin elektroniikkalaitteiden kierrättämiseen.

Bioteknologian potentiaalinen ratkaisu elektroniikkajätteen käsittelemiseen on biometallurgia. Biometallurgia perustuu jätteiden tai malmien erottelemiseen metalleista mikro-organismien avulla. Biometallurgia on saanut suurta huomiota viime vuosikymmenten aikana suurilta kansainvälisiltä yrityksiltä. [13]

Yksi ratkaisu voisi olla myös metallien irrottaminen romusta happoliuotuksen ja tutkijoiden kehittämien sieppareiden avulla [30]. Sieppareiden toiminta perustuu siihen, että ne ”kaappaavat” tiettyjä metalleja romun seasta [31]. Suomessa on jo onnistuttu keräämään arvometalleja pienellä mittakaavalla piirilevymurskasta. Tutkijoiden tavoitteena on laajentaa toimintaa ja rakentaa Keski-Suomeen kerrostalo eli täyden koon metallientuotantolaitos, jossa voitaisiin suuremmalla mittakaavalla erotella ja ottaa talteen arvometalleja elektroniikkajätteestä. Tällainen ratkaisu vähentäisikin tarvetta metallien hankkimiseen ulkomailta. [30]

6.2 Kuluttajien rooli

Kuluttajat ovat keskeisessä asemassa oikeastaan millä tahansa toimialalla, kun puhutaan ilmastonmuutoksen torjumisesta. Tämä korostuu myös elektroniikkateollisuudessa. Kuluttajien tietoisuuden kasvattaminen elektroniikkalaitteiden kierrättämisestä onkin tulevaisuuden kannalta yksi keskeisimmistä tekijöistä ilmastonmuutoksen torjunnassa. Kuluttajat voivatkin vaikuttaa tähän suoraan kierrätysmenetelmiä hyödyntämällä. Kuluttajien tietoisuutta ja tämän myötä myös kierrättämistä voitaisiin kasvattaa esimerkiksi erilaisten kampanjoiden ja helppokäyttöisten kierrätysmenetelmien avulla. Lisäksi erilaiset sovellukset kierrätyksen tietoisuuden kasvattamisessa voisivat modernissa yhteiskunnassa olla hyvä ratkaisu. Tietoisuuden kasvattaminen korostuu erityisesti kehitysmaissa, sillä kierrätysmenetelmät ovat hyvin vajavaiset monissa maissa, eikä tämän takia kierrättäminen ole välttämättä aina edes mahdollista [13].

Viherpesu on käsite, joka nousee usein esille, kun puhutaan kuluttajien markkinoinnista elektroniikkalaitteiden alalla. Viherpesu määritellään kuluttajien harhaanjohtamiseksi tuotteen markkinoinnissa [32]. Viherpesun vaarana on, että täysin toimiva laite vaihdetaan uuteen vaihtoehtoon, jonka uskotaan olevan ympäristöystävällisempi. Näin ollen vanha toimiva laite voi joutua kaatopaikalle, ilman kierrättämistä tai materiaalien talteenottoa. Siksi onkin tärkeää kuluttajana tunnistaa mahdollinen viherpesu ja pohtia tarkkaan uuden laitteen ostamisen tarvetta. Vastuu ilmastonmuutoksen torjumisessa ei ole siis ainoastaan yritysten vastuulla vaan myös kuluttajien.

6.3 Globaali yhteistyö

Ilmastonmuutoksen torjumiseksi globaali yhteistyö valtioiden välillä on elintärkeää elektroniikkajätteen kierrätyksen yhdenmukaistamisessa. Erilaiset yhteiset standardit ja

säädökset luovat pelisäännöt. Näitä pelisääntöjä on kaikkien eri valtioiden noudatettava, jotta päästään haluttuun lopputulokseen.

Myös erilaisten tutkimusten suorittaminen ja tulosten jakaminen maiden kesken on tärkeää uusien teknologioiden kehittämisen kannalta. Näin voidaan tehokkaasti löytää yhdessä ratkaisuja elektroniikkajätteen kierrätysmenetelmiin ja potentiaalisesti jopa ratkaista globaaleja ympäristöhaasteita. Euroopan unioni onkin jo kehittänyt yhden tämäntapaisen ohjelman: ohjelman nimi on “Horizon Europe” ja sen tarkoituksena on Euroopan unionin valtioiden välillä tehdä tutkimustyötä sekä kehittää innovatiivisia kestäviä ratkaisuja UN:n (united nations, suomeksi yhdistyneet kansakunnat) kestävän kehityksen tavoitteiden saavuttamiseksi [33]. Juurikin tällaiset ohjelmat ovat sellaisia, joita tarvitaan ilmastonmuutoksen torjumisessa elektroniikkalaitteiden kierrätyksen kannalta.

Tulevaisuudessa myös kehitysvaltioiden tukeminen kierrättämisessä on erittäin tärkeä aspekti, kun puhutaan ilmastonmuutoksen torjumisesta. Kehitymaissa on kuitenkin paljon erilaisia haasteita ja kehityskohteita verrattuna hyvinvointivaltioihin. Tämän takia kierrättäminen ei ole välttämättä prioriteettilistalla ensimmäisenä ja esimerkiksi taloudellinen tuki kierrätysjärjestelmien parantamiseksi voisi huomattavasti vähentää elektroniikkajätteestä aiheutuvia ympäristövaikutuksia. Tämä onkin tulevaisuuden kannalta tärkeää ottaa huomioon, sillä ilmastonmuutos on globaali ilmiö ja koskettaa jokaista maanosaa.

6.4 Kiertotalouden edistäminen

Kiertotalous on termi, joka on tullut kandidaatin tutkielmassani jo aiemminkin esiin. Kiertotalouden edistäminen onkin yksi keskeisimmistä tekijöistä tulevaisuudessa ilmastonmuutoksen torjumisessa. Kiertotalous liittyy vahvasti jokaiseen elektroniikkalaitteen elinkaaren osaan, joita ovat valmistus, käyttö sekä jätteiden käsittely. Kiertotaloutta voidaan edistää sillä, että tehdään laitteista jatkossa vielä entistäkin enemmän sellaisia, että niiden osat ovat vaihdettavissa [34]. Lisäksi laitteiden olisi hyvä sisältää kierrätettäviä materiaaleja, jotta kiertotaloutta ja kestävän kehityksen periaatteita voitaisiin edistää elektroniikkalaitteiden tuotannossa [34].

Toinen tapa, jolla kiertotaloutta voitaisiin edistää elektroniikkalaitteiden tuotannossa, on erilaisten liiketoimintamallien päivittäminen. Liiketoimintamallien päivittäminen siten, että otetaan erilaiset ympäristönäkökulmat ja kiertotalouden periaatteet paremmin huomioon voisi edistää kiertotaloutta tulevaisuudessa. Esimerkiksi vuokraamalla laitteita, voitaisiin vähentää tuotannon tarvetta valmistaa laitteita ja näin voitaisiin säästää luontoa. Lisäksi

liiketoimintamallien päivittäminen ympäristönäkökulmien kautta voisi lisätä kierrätyksen määrää sekä elektroniikkalaitteiden uudelleenkäyttöä. [35]

7. YHTEENVETO

Kierrätys ja kestävä kehitys ovat viime vuosina nousseet laajalti esille suuren ympäristöuhan ja sen näkyvien vaikutusten vuoksi. Tämän takia monilla toimialoilla, kuten myös elektroniikkateollisuudessa on alettu panostamaan enemmän elektroniikkalaitteiden kierrätykseen ja laitteiden modulaarisuuteen. Työni tarkoituksena oli pohtia, minkälaisia haasteita elektroniikkalaitteiden kierrätykseen liittyy ja minkälainen potentiaali sillä on tulevaisuutta ajatellen. Työssäni tarkoituksena oli myös pyrkiä tuomaan kestävän kehityksen ja kiertotalouden periaatteita esille sekä selvittämään erilaisia teknologioita ja elektroniikkalaitteiden elinkaarenhallinnan strategioita. Työssäni oli myös tärkeänä osana lainsäädäntö liittyen elektroniikkalaitteiden näkökulmasta.

Työn alussa käsiteltiin kestävää kehitystä, kierrätystä ja kiertotaloutta elektroniikkalaitteiden tuotesuunnittelun ohella. Kestävän kehityksen käsite onkin laaja käsite, joka kattaa sekä kierrätyksen että kiertotalouden. Kestävän kehityksen periaatteita on tärkeää soveltaa elektroniikkalaitteiden suunnittelussa sekä jätteiden käsittelyssä.

Kierrätys on tärkeä osa kestävää kehitystä ja se keskittyy enemmänkin elektroniikkajätteiden sisältämien materiaalien uudelleenkäyttöön. Tämä säästää luontoa todella paljon, koska uusien materiaalien käytön tarve vähenee.

Kiertotalous on niin ikään osana kestävän kehityksen kokonaisuutta ja sen avulla voidaan myös vähentää kertyvän elektroniikkajätteen määrää. Kiertotalouden edistämisellä voidaan tuoda enemmän esille ympäristöystävällistä talousmallia, joka auttaisi omalta osaltaan ilmastonmuutoksen torjumisessa.

Seuraavassa luvussa käsiteltiin tarkemmin elektroniikkalaitteiden kierrätyksen haasteita ja mahdollisuuksia sekä erilaisia kierrätysteknologioita. Luvussa tuli vahvasti esille se, että kierrätysteknologioita on kyllä jo hyvin kehitetty, mutta niissä on hyvien puolien lisäksi myös haittapuolia. Lisäksi nämä kierrätysteknologiat eivät ole kovinkaan hyvin levinnyt kehitysmaihin, mikä olisi elintärkeää ilmastonmuutoksen torjumisen kannalta. Lisäksi kierrätys itsessään elektroniikkajätteen osalta on hyvin vähäistä erityisesti kehitysvaltioissa.

Elektroniikkalaitteiden elinkaarenhallinta on keskeinen tekijä kierrätyksessä ja kiertotalouden edistämisessä. Pyrin työssäni tuomaan esille erilaisia tapoja, joilla elektroniikkalaitteiden elinkaarta voidaan hallita. Lisäksi pyrkimykseni oli tuoda esille elinkaarenhallinnan eri vaiheet. Elinkaarenhallinnan yksi keskeisistä tekijöistä onkin hyvä

suunnittelu, sillä se vaikuttaa suoraan siihen, miten elektroniikkalaitetta voidaan huoltaa ja kierrättää. Lisäksi elinkaarenhallintaa on sovellettava käytön aikana esimerkiksi huoltotoimenpiteiden avulla ja käytön jälkeen esimerkiksi kierrättämällä.

Elektroniikkalaitteiden kierrätystä varten on luotu säädökset ja lait, jotta kaikki kierrättävät standardien mukaisesti. Näin voidaan turvata ympäristönhyvinvointi myös tuleville sukupolville. Työssäni toin esille erilaisia säädöksiä ja lakeja, joita on tehty niin kansainvälisellä tasolla kuin paikallisella tasolla. Nämä säädökset ja lait takaavat sen, että kierrätystä tapahtuu tasapuolisesti ja elektroniikkajätteen käsitteleminen on asianmukaista.

Toin työssäni lisäksi vielä kootusti eri aihealueiden tulevaisuuden näkymiä esille. Esimerkiksi tekoäly ja bioteknologia ovat esille nousseita ratkaisuja, joilla voidaan tulevaisuudessa mahdollisesti saada elektroniikkalaitteilla vielä entistäkin tehokkaampia ja kannattavampia kierrätysratkaisuja. Lisäksi esille nousi kuluttajien rooli tulevaisuudessa: kuluttajien tietoisuus kierrättämisestä ja kierrättämiseen motivoiminen esimerkiksi helppojen järjestelmien avulla voi olla avainasemassa kierrättämisen toteutumisessa.

Luvussa nousi lisäksi esille globaalin yhteistyön merkitys elektroniikkajätteen kierrätysmenetelmien kehittämisessä. Globaali yhteistyö on ilmastonmuutoksen torjumisessa hyvin tärkeää, koska silloin voidaan torjua ilmastonmuutosta maailmanlaajuisesti. Myös kiertotalouksen edistäminen tulee olemaan tulevaisuudessa yksi tärkeimmistä ilmastonmuutoksen mahdollisesti estävistä tekijöistä.

Kaiken kaikkiaan elektroniikkalaitteiden elinkaarenhallinta kaikkien eri vaiheiden osalta on hyvin monimutkainen prosessi ja on mietittävä tarkkaan, miten kestävän kehityksen periaatteet otetaan huomioon: varsinkin kierrätys ja kiertotalouden edistäminen voi vaatia uhrauksia niin yrityksiltä kuin myös valtioilta. Lisäksi on tärkeää, että pidetään kiinni niistä laista, standardeista ja säädöksistä, joita on valmiiksi jo tehty ja tehdään niitä tarvittaessa myös lisää. Elektroniikkalaitteiden tuotesuunnittelussa on myös tärkeää maailmanlaajuinen yhteistyö uusien innovaatioiden ja kierrätysmenetelmien kehittämisessä sekä kuluttajien tietoisuuden lisääminen.

LÄHTEET

[1] L. Hou, H. Yu, M. Song, New Development of Sustainable Design under the Background of Smart City. In 2020 International Conference on Intelligent Design, 2020. Saatavissa (viitattu 22.2.2024): New Development of Sustainable Design under the Background of Smart City | IEEE Conference Publication | IEEE Xplore (tuni.fi)

[2] M.J. Epstein and M.-J. Roy, Sustainability in action: Identifying and measuring the key performance drivers, Long Range Plan, vol. 34, pp. 585-604, 2001. Saatavissa (viitattu 22.2.2024): Sustainability in Action: Identifying and Measuring the Key Performance Drivers - ScienceDirect

[3] R. T. Sirazetdinov, A. V. Samodurov, A. N. Khusnutdinov, E. N. Tarchinskaya, Sustainable development of manufacturing enterprises based on structural, infological and dynamic modeling, 2016. Saatavissa (viitattu 22.2.2024): Sustainable development of manufacturing enterprises based on structural, infological and dynamic modeling | IEEE Conference Publication | IEEE Xplore (tuni.fi)

[4] G. AlZohbi, A. Alzahrany, G. Gabir, Climate change in Kingdom of Saudi Arabia: Effects, Trends and Planned Actions, 2021. Saatavissa (viitattu 28.2.2024): Climate Change in Kingdom of Saudi Arabia: Effects, Trends and Planned Actions | IEEE Conference Publication | IEEE Xplore (tuni.fi)

[5] Y. Rebahi, B. Hilliger, P. Lowin, A. Cardoso, AI Based Predictive Maintenance as a Key Enabler for Circular Economy, 2023. Saatavissa (viitattu 4.3.2024): AI Based Predictive Maintenance as a Key Enabler for Circular Economy: The KYKLOS 4.0 Approach | IEEE Conference Publication | IEEE Xplore (tuni.fi)

[6] F. Jawab, Y. El Mokkadem, Territorial Logistics Governance and Sustainable Development Challenges : (Analysis and evaluation of the logistics and competitiveness of the Casablanca-Settat region), 2018. Saatavissa (viitattu 4.3.2024): Territorial Logistics Governance and Sustainable Development Challenges : (Analysis and evaluation of the logistics competitiveness of the Casablanca-Settat region) | IEEE Conference Publication | IEEE Xplore (tuni.fi)

[7] L. Zhou, S. Cao, J. Liu, T. Tan, F. Du, Y. Fang, L. Zhang, Design, manufacturing and recycling in product lifecycle: New challenges and trends, 2018. Saatavissa (viitattu 21.3.2024): Design, manufacturing and recycling in product lifecycle: New challenges and trends | IEEE Conference Publication | IEEE Xplore (tuni.fi)

[8] W. Deng, E-Waste Management: Challenges and Opportunities, 2019. Saatavissa (viitattu 8.4.2024): E-Waste Management: Challenges and Opportunities | SpringerLink

[9] S. Ghulam, H. Abushammala, Challenges and Opportunities in the Management of Electronic Waste and Its Impact on Human Health and Environment, 2023. Saatavissa (viitattu 8.4.2024): Sustainability | Free Full-Text | Challenges and Opportunities in the Management of Electronic Waste and Its Impact on Human Health and Environment (mdpi.com)

[10] J. Okeme, V. Arrandale, Electronic Waste Recycling: Occupational Exposures and Work-Related Health Effects, 2019. Saatavissa (viitattu 8.4.2024): Electronic Waste Recycling: Occupational Exposures and Work-Related Health Effects | Current Environmental Health Reports (springer.com)

[11] M. Kaya, Recovery of metals and nonmetals from electronic waste by physical and chemical recycling processes, 2016. Saatavissa (viitattu 8.4.2024): Recovery of metals and nonmetals from electronic waste by physical and chemical recycling processes - ScienceDirect

[12] L. Zhang, Z. Xu, A review of current progress of recycling technologies for metals from waste electrical and electronic equipment, Journal of cleaner production, 127, 2016, s. 19-36. Saatavissa (viitattu 11.4.2024): A review of current progress of recycling technologies for metals from waste electrical and electronic equipment - ScienceDirect

[13] J. Cui, L. Zhang, Metallurgical recovery of metals from electronic waste: a review, Journal of Hazardous Materials, 158(2-3), 2008, s. 228-256. Saatavissa (viitattu 11.4.2024):Metallurgical recovery of metals from electronic waste: A review - ScienceDirect

[14] V. Gečevska, P. Chiabert, Z. Anisic, F. Lombardi, F. Čuš, Product lifecycle management through innovative and competitive business environment, Journal of Industrial Engineering and Management, 3, 2010, s. 323-336. Saatavissa (viitattu 12.7.2024): (PDF) Product lifecycle management through innovative and competitive business environment (researchgate.net)

[15] I. Gremyr, V. Siva, H. Raharjo, T. Goh, Adapting the Robust Design Methodology to support sustainable product development, Journal of Cleaner Production, 79, 2014, s. 231-238. Saatavissa (viitattu 12.7.2024): Adapting the Robust Design Methodology to support sustainable product development | Request PDF (researchgate.net)

[16] V. Salehi, C. McMahon, Methodological Integration of Parametric Associative CAD Systems in Product Lifecycle Management (PLM) Environment, Journal of Industrial Engineering and Management, 2009, s. 505-514. Saatavissa (viitattu 16.7.2024): (PDF) Methodological Integration of Parametric Associative CAD Systems in Product Lifecycle Management (PLM) Environment (researchgate.net)

[17] I. Essop, R. Evans, S. Wan, M. P. Giddaluru, J. X. Gao, D. Baudry, S. Mahdikhah, M. Messaadia, Investigation into current industrial practices relating to product lifecycle management in a multi-national manufacturing company, Computer-aided Design and Applications, 13, 2015, s. 647-661. Saatavissa (viitattu 16.7.2024): Investigation into current industrial practices relating to product lifecycle management in a multi-national manufacturing company: Computer-Aided Design and Applications: Vol 13 , No 5 - Get Access (tandfonline.com)

[18] H. Habib, R. Menhas, O. McDermott, Managing Engineering Change within the Paradigm of Product Lifecycle Management, Processes, 2022. Saatavissa (viitattu 16.7.2024): Processes | Free Full-Text | Managing Engineering Change within the Paradigm of Product Lifecycle Management (mdpi.com)

[19] M. Kalverkamp, A. Pehlken, T. Wuest, Cascade Use and the Management of Product Lifecycles, Sustainability, 9, 2017, s. 1540. Saatavissa (viitattu

20.7.2024): Sustainability | Free Full-Text | Cascade Use and the Management of Product Lifecycles (mdpi.com)

[20] S. Sihvonen, T. Ritola, Conceptualizing ReX for Aggregating End-of-life Strategies in Product Development, Procedia CIRP, 29, 2015, s. 639-644. Saatavissa (viitattu 20.7.2024): Conceptualizing ReX for Aggregating End-of-life Strategies in Product Development - ScienceDirect

[21] Basel Convention. The Basel Convention on the Control of Transboundary Movements of Hazardous Wastes and Their Disposal, 1989. Saatavissa (viitattu 29.7.2024): Basel Convention > The Convention > Overview

[22] SFS. ISO 14000 ympäristöjohtamisen standardisarja. Saatavissa (viitattu 29.7.2024): ISO 14000 Ympäristöjohtamisen standardisarja | SFS

[23] European Parliament and Council. Directive 2012/19/EU on Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE), 2012. Saatavissa (viitattu 29.7.2024): Directive - 2012/19 - EN - EUR-Lex (europa.eu)

[24] A. Gottberg, J. Morris, S. Pollard, C. Mark-Herbert, M. Cook. Producer responsibility, waste minimisation and the WEEE Directive: case studies in eco-design from the European lighting sector. The Science of the total environment, 2006. Saatavissa (viitattu 29.7.2024): Producer responsibility, waste minimisation and the WEEE Directive: Case studies in eco-design from the European lighting sector - ScienceDirect

[25] European Commission. Ecodesign for sustainable products regulation. Saatavissa (viitattu 29.7.2024): Ecodesign for Sustainable Products Regulation -European Commission (europa.eu)

[26] Finlex. Jätelaki (17.6.2011/646), 2011 Saatavissa (viitattu 2.8.2024): Jätelaki 646/2011 - Ajantasainen lainsäädäntö - FINLEX ®

[27] Valtioneuvosto. Kiertotalouden strategisen ohjelman toimeenpano, 2021 Saatavissa (viitattu 2.8.2024): Kiertotalouden strategisen ohjelman toimeenpano - Valtioneuvosto

[28] Ympäristöministeriö. Ympäristöministeriön vastuualueet. Saatavissa (viitattu 2.8.2024): Vastuualueet - Ympäristöministeriö

[29] R. A. Silva, S. V. R. Araújo, R. de Oliveira Neto, et al., Biotechnological processes for metal recovery from e-waste: A review. Bioresource Technology Reports, vol. 20, 2024, s. 101405. Saatavissa (viitattu 5.8.2024): Smart waste management: A paradigm shift enabled by artificial intelligence - ScienceDirect

[30] R. Pennanen. Elektroniikkaromussa on jopa sata kertaa enemmän kultaa kuin kaivosmalmissa – piirilevyjen metallit saadaan talteen uudella menetelmällä. YLE, 2020. Saatavissa (viitattu 5.8.2024): Elektroniikkaromussa on jopa sata kertaa enemmän kultaa kuin kaivosmalmissa – piirilevyjen metallit saadaan talteen uudella menetelmällä | Yle

[31] R. Pennanen. Sukkahousuilla nappaa kullan paremmin kuin urheilusukilla – kemistit kehittivät yksinkertaisen tavan ottaa talteen arvometalleja. YLE, 2019. Saatavissa (viitattu 5.8.2024): Sukkahousuilla nappaa kullan paremmin kuin

urheilusukilla – kemistit kehittivät yksinkertaisen tavan ottaa talteen arvometalleja | Yle

[32] d. F. Netto, S.V., Sobral, M.F.F., Ribeiro, A.R.B. et al. Concepts and forms of greenwashing: a systematic review. Environ Sci Eur 32, 19, 2020. Saatavissa (viitattu 5.8.2024): Concepts and forms of greenwashing: a systematic review | Environmental Sciences Europe | Full Text (springeropen.com)

[33] European Commission. Horizon Europe: Framework Programme for Research and Innovation. Saatavissa (viitattu 5.8.2024): Horizon Europe - European Commission (europa.eu)

[34] Ellen MacArthur Foundation. Towards the Circular Economy: Economic and Business Rationale for an Accelerated Transition, 2013 Saatavissa (viitattu 9.8.2024): Towards the circular economy Vol 1: an economic and business rationale for an accelerated transition.pdf (thirdlight.com)

[35] Tukker, A. Product services for a resource-efficient and circular economy – a review. Journal of Cleaner Production, 97, 2015, 76-91. Saatavissa (viitattu 9.8.2024): Product services for a resource-efficient and circular economy – a review - ScienceDirect